

Propriétés hydriques des sols et alimentation en eau des oléagineux pérennes en Afrique de l'Ouest

J. OLIVIN (1) et R. OCHS (2)

Résumé. — Les propriétés hydriques de quelques sols sédimentaires plantés en palmiers à huile et en cocotiers en Côte-d'Ivoire et au Bénin sont étudiées. Ils ont en commun des profils homogènes, profonds, une fraction argileuse composée essentiellement de kaolinite, de faibles teneurs en limon et en matière organique. Le cas particulier des sols côtiers, très sableux (sables grossiers), plantés en cocotiers est abordé. Les caractéristiques hydriques étudiées sont les humidités à la capacité au champ (mesure gravimétrique) et à différents pF (mesures de laboratoire) dont celui du point de flétrissement permanent. L'exposé des résultats est précédé d'un commentaire sur la signification réelle de ces caractéristiques dans les relations eau-sol-plante et sur la précision des mesures. L'interprétation des résultats montre que pour des sols ayant au moins 8 à 10 p. 100 d'argile, les humidités correspondant à la capacité au champ et aux différents pF sont des fonctions linéaires croissantes de la teneur en argile mais que le domaine d'eau disponible diminue lorsque la teneur en argile augmente. Le potentiel de la capacité au champ dépend lui aussi de la texture. Les sols très sableux comportant 80 à 95 p. 100 de sables grossiers retiennent une très faible quantité d'eau utilisable par les plantes. Le cas des sols riches en sables fins est plus complexe. Sur la base de ces conclusions, l'I. R. H. O. recommande pour les programmes de développement en régions relativement sèches de s'orienter de préférence vers des sols à texture légère tout en évitant de franchir le seuil de 15 p. 100 d'argile au-delà de 40 cm de profondeur sauf, bien entendu, s'il existe une nappe phréatique peu profonde. Ces conclusions ne s'appliquent bien entendu qu'à des sols voisins de ceux qui ont été utilisés dans cette étude, et font abstraction des problèmes de composition chimique qui sont également pour une part liés à la texture.

Le palmier à huile et le cocotier sont des plantes très exigeantes en eau ; de très nombreuses observations montrent que la production maximale ne peut être atteinte que si ces cultures disposent d'une quantité d'eau égale, ou très proche, à celle correspondant à l'évapo-transpiration potentielle (ETP). L'I. R. H. O. a pu montrer, à partir des productions annuelles observées dans les stations de recherches auxquelles il apporte son concours, qu'il existe une relation inverse entre le déficit hydrique annuel calculé selon une méthode simplifiée [1] et la production en régimes du palmier [2], ou la production en coprah du cocotier [3], toutes choses égales par ailleurs.

Les besoins en eau des cultures oléagineuses pérennes sont, dans la plupart des cas, assurés uniquement par la pluie mais de façon plus ou moins satisfaisante. Il existe évidemment dans la zone intertropicale des régions privilégiées où la répartition des pluies est suffisante pour compenser totalement l'ETP (100 à 150 mm par mois selon le pouvoir évaporant du climat). Le sol n'a plus alors qu'un rôle tampon relativement faible puisque les plantes ne font appel à ses réserves en eau que pendant de courtes périodes limitées à quelques jours ; les réserves sont de plus très rapidement reconstituées. Mais en général, les régimes pluviométriques qui prédominent, surtout en Afrique de l'Ouest, comportent une ou deux saisons sèches d'inégales durées pendant lesquelles les pluies sont inférieures à l'ETP. Le sol intervient alors par ses réserves en eau pour réduire ou compenser les déficits momentanés.

Les situations où une nappe phréatique à faible profondeur (2 à 3 m) compense les conséquences défavorables d'un déficit pluviométrique sont exceptionnelles. L'irrigation qui demande des investissements élevés est encore peu utilisée, malgré les fortes augmentations de rendement qu'elle procure dans les situations à climatologie très marginale [4, 5].

Les caractéristiques hydriques des sols, le domaine d'eau disponible (DED) en particulier, revêtent donc une importance capitale puisqu'elles déterminent en grande partie la valeur agrologique des sols vis-à-vis des plantes pérennes très exigeantes en eau. R. Ochs avait entrepris dès 1957 au Bénin les premières études sur les relations entre les caractéristiques hydriques et physiques des sols à palmiers. En 1965, il avait publié avec J. Olivin [6] les résultats des observations effectuées à la station de Pobé en montrant que le DED diminue lorsque le taux d'éléments fins augmente. Ce résultat qui était en contradiction avec les théories couramment admises à l'époque, méritait d'être confirmé et vérifié en élargissant l'étude à d'autres types de sol notamment dans le domaine des sols très sableux.

I. — DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Parmi les très nombreux sols utilisés pour la culture du palmier et du cocotier le choix a été délibérément orienté vers des sols à profils « simples », homogènes, profonds sans discontinuité texturale ou structurale, afin d'éviter les variations trop brutales du flux et des forces de succion matricielle [7] qui risqueraient de compliquer les mesures et l'interprétation.

1. — Les sols étudiés.

a) Classification.

Les sols étudiés sont ceux des stations d'amélioration de Pobé (Bénin) et de La Mé (Côte-d'Ivoire) pour le palmier à huile et de Port-Bouet (Côte-d'Ivoire) pour le cocotier. Ils sont représentatifs des grandes zones de développement de ces deux cultures (150 000 ha plantés de 1964 à 1975 dans ces deux pays). Des sols très semblables à ceux de La Mé se retrouvent dans les zones élaéicoles du Cameroun, du Nigeria (Acid Sands Calabar Fasc) et du Nord-Brésil (Formations Barreiras).

(1) Département Agronomie de l'I. R. H. O.

(2) Directeur du Département Agronomie de l'I. R. H. O.

Bénin.

Sols ferrallitiques faiblement désaturés appauvris modaux (station de Pobé).

— Sol rouge sur sédiments argilo-sableux du continental terminal appelé généralement « terre de barre », et série PO1 dans cet article.

— Sol beige sur colluvions du précédent, série PO2.

Côte-d'Ivoire.

Sol ferrallitique fortement désaturé appauvri modal (station de La Mé).

— Sol jaune sur sédiments sablo-argileux du continental terminal (Tertiaire) appelé généralement « Sables tertiaires », série LM.

Sol ferrallitique fortement désaturé appauvri modal (station de Port-Bouet).

— Sol jaune sur colluvions sableuses de la série précédente, série PB1.

Sol peu évolué d'apport (station de Port-Bouet).

— Sables roux d'origine marine du quaternaire, série PB2.

b) Caractéristiques physiques (Tabl. I).

La granulométrie montre que l'enrichissement en argile de la surface vers la profondeur est relativement progressif pour les séries LM et PO2 tandis qu'il existe une discontinuité texturale et structurale nette au niveau de l'interface des horizons A et B dans la série PO1. Les séries PO1 et PO2 formées à partir du même matériau sédimentaire ont un taux de sables grossiers faible variant entre 4 et 24 p. 100 et le plus souvent entre 10 et 15 p. 100. Au contraire, la série LM a un taux de sables grossiers plus élevé variant entre 55 et 63 p. 100. Lorsqu'il y a équivalence des teneurs en argile, les échantillons des séries PO1 et PO2 d'une part et LM d'autre part se distinguent donc par une granulométrie des sables très différente. Les séries PB1 et PB2 sont constituées pour 82 p. 100 (série PB1) et 93 p. 100 (série PB2) de sables grossiers, le taux d'argile est négligeable pour PB2 et extrêmement faible (± 5 p. 100) pour PB1.

La granulométrie détaillée des sables met aussi en évidence des différences entre ces sols. La teneur moyenne sur l'ensemble du profil de la fraction des sables grossiers, dont le diamètre excède 400 μ , n'est que de 3 p. 100 pour les séries PO1 et PO2, elle n'est encore que de 29 p. 100 pour la série LM — dont les Sg sont donc relativement fins — par contre, elle atteint 55 p. 100 pour la série PB1 et 77 p. 100 pour la série PB2.

Tous les sols concernés ont cependant en commun des taux de limon et de sables très fins (encore appelé limon grossier) faibles ou très faibles, qui traduisent un degré d'évolution pédologique avancé.

Les types d'argiles minéralogiques ont été identifiés par la méthode des spectres de rayons X qui permet seulement une détermination semi-quantitative. Ces analyses montrent que pour tous les sols étudiés la fraction argileuse est constituée essentiellement par un seul type d'argile non gonflante : la kaolinite. Les autres types d'argile montmorillonite, vermiculite n'existent qu'à l'état de trace et leur rôle vis-à-vis de l'eau peut être considéré comme négligeable. Les

taux de *matière organique* sont faibles ou très faibles et ne doivent pas interférer de façon sensible sur les caractéristiques hydriques des sols.

c) Caractéristiques hydriques (Tabl. I).

Les réserves en eau utilisable par les plantes, appelées domaine d'eau disponible (DED), sont mesurées conventionnellement par la différence d'humidité des sols entre la capacité au champ (CC) et le point de flétrissement permanent (PFP). C'est une simplification pratique car il faut souligner que ces deux notions ne correspondent pas à des états précis soit du sol soit de la relation sol-plante [7, 8], et avant d'étudier les nouveaux résultats il est indispensable de faire quelques commentaires sur leur signification réelle.

La *capacité au champ* est par définition l'humidité résiduelle du sol après le départ de l'eau de gravité, suite à une phase de « drainage rapide » d'une durée fixée arbitrairement à 3 jours. En fait, la durée réelle du drainage rapide varie selon les types de sol, et elle est de plus suivie par une période de « drainage lent » durant laquelle les pertes en eau peuvent être encore sensibles [7]. Le ressuyage serait donc un phénomène continu [8] et la capacité au champ correspondrait à un état passager du sol difficile à saisir expérimentalement.

Le *point de flétrissement permanent* est par définition l'humidité pour laquelle le flétrissement de la plante devient irréversible. Le potentiel matriciel (*) (16 bars) correspondant serait pratiquement indépendant du sol et de la plante bien que certaines plantes pourraient encore utiliser une partie de l'eau d'hygroscopicité. En fait, le flétrissement définitif n'intervient probablement pas dès que le potentiel du sol voisine ou atteint 16 bars mais au bout d'un temps plus ou moins long selon l'aptitude des plantes à résister à la sécheresse. Ainsi, une plante comme le palmier à huile peut, grâce à l'excellente efficacité de sa régulation stomatique, réduire presque totalement son évaporation et retarder pendant plusieurs semaines les effets irréversibles du dessèchement du sol sur la physiologie de l'arbre. Le PFP caractérise donc un état précis du sol (eau retenue en équilibre avec un potentiel de 16 bars) mais il ne correspond pas toujours à un stade bien déterminé des relations eau-sol-plante. Il ne faut cependant pas croire que les activités physiologiques du palmier et du cocotier restent inchangées lorsque l'humidité du sol décroît de la capacité au champ vers le PFP. De nombreux travaux de l'I. R. H. O. ont montré au contraire que 2 à 3 semaines après l'arrêt des pluies, alors que les réserves en eau du sol sont loin d'être épuisées, le palmier commence à fermer ses stomates et à réduire sa transpiration. Mais cette mesure de défense réduit également l'absorption de gaz carbonique et par voie de conséquence la photosynthèse, la croissance et la production. Une réduction sensible de la production apparaissait déjà dans un essai d'irrigation [4] lorsque l'ouverture des stomates était maintenue par une

(*) Rappelons que le potentiel matriciel peut se définir comme l'énergie nécessaire pour extraire du sol l'unité de masse d'eau et la porter à l'état d'eau libre (aux mêmes hauteur, température et pression osmotique). Il est numériquement égal à la tension P de l'eau dans le sol (tension attribuable aux phénomènes de capillarité, d'adhésion liquide-solide...); par définition : $pF = \log P$, P étant exprimé en cm.

TABLEAU I

Bénin : Terre de barre — Série PO1 (Series)														
Profondeur (Depth) (cm)	Granulométrie (Grain size distribution) p. 100 P.S (D. W)					MO p. 100	Caractéristiques hydriques : humidité — p. 100 P. S (Hydrological characteristics : moisture — p. 100 D. W)							
	A	L	Stf	Sf	Sg		CC	PFP	DED	pF 3,0	pF 2,5	pF 2,3	pF 2,0	pF 1,8
0-10	6,6	4,3	2,2	62,9	24,0	1,48	15,0	3,7	11,3	5,8	7,3	8,8	9,6	16,0
30-40	12,4	7,5	2,7	54,0	23,4	0,91	14,6	5,7	8,9	8,0	10,2	12,9	14,9	21,9
60-70	43,9	4,7	1,4	35,3	14,7	0,76	19,2	13,4	5,8	17,1	19,1	23,3	24,6	33,7
90-100	41,3	8,2	2,1	34,4	14,0	0,53	20,2	14,6	5,6	18,3	20,3	24,3	26,1	33,0
120-130	48,5	5,7	1,9	31,1	12,8		20,0	15,2	4,8	19,6	21,2	26,0	26,9	33,3
150-160	55,5	3,5	1,9	22,3	12,7		20,5	15,5	5,0					
180-190	55,5	3,2	1,8	23,1	12,5		21,0	15,5	5,5					
210-220	55,5	4,2	2,2	23,2	12,2		20,5	15,5	5,0					
240-250	56,7	2,5	2,6	24,8	11,5		20,0	15,0	5,0					
270-280	47,7	5,2	2,7	28,9	12,0		20,0	15,0	5,0					
300-310	47,5	7,2	3,0	30,5	11,7		19,5	15,0	4,5					
Bénin : Colluvions de (Colluvial soils of) terre de barre — Série PO2 (Series)														
0-10	6,6	5,6	2,6	70,9	14,3	1,41	17,9	3,8	14,1	7,2	7,3	10,5	11,1	14,7
30-40	5,2	6,2	2,4	70,9	15,3	0,66	14,5	2,2	12,3	5,2	5,7	7,8	8,6	20,6
60-70	5,5	4,7	2,4	69,8	17,6	0,31	13,7	1,7	12,0	3,9	4,7	7,2	8,2	20,8
90-100	16,9	6,3	2,8	60,2	13,8	0,40	15,5	4,9	10,6	9,8	12,5	14,7	16,5	27,0
120-130	15,5	7,3	3,5	59,6	14,1	0,31	14,7	4,4	10,3	8,3	10,3	13,6	16,1	24,7
150-160	27,5	4,7	4,4	48,1	11,5		17,5	10,0	7,5					
180-190	37,5	5,5	5,1	42,2	10,9		18,5	11,5	7,0					
210-220	36,0	5,0	4,5	40,6	9,8		20,5	13,5	7,0					
240-250	47,5	7,2	4,8	29,6	7,9		23,0	17,0	6,0					
270-280	50,5	8,5	6,2	25,8	6,0		24,5	18,5	6,0					
300-310	59,2	10,0	8,5	13,8	4,1		26,0	20,5	5,5					
Cote-d'Ivoire : Sables tertiaires — Série LM (Ivory Coast : Tertiary sands — LM series)														
0-15	11,1	3,0	2,6	20,8	62,5	1,32	13,5	4,9	8,6	7,4	7,5	8,5	11,4	20,0
15-30	14,6	2,7	2,5	22,0	58,2	1,05	14,2	5,6	8,6	8,0	8,9	9,4	11,9	19,2
30-50	17,0	2,4	3,1	19,4	58,1	0,76	14,1	6,5	7,6	8,9	9,9	10,8	13,5	20,9
50-100	22,1	2,9	2,4	18,0	54,6	0,58	15,0	7,9	7,1	11,2	11,6	12,4	16,6	24,3
100-150	19,5	2,4	2,5	19,4	56,2	0,50	14,1	7,7	6,4	10,2	11,1	11,9	15,8	23,6
Cote-d'Ivoire : Colluvions de sables tertiaires — Série PB1 (Ivory Coast : Colluvial soils of tertiary sands — PB1 series)														
0-15	5,0	4,4	0,5	7,6	82,5	0,43	4,4	2,2	2,2	4,7	5,9	—	—	9,9
15-30	6,2	1,7	0,4	6,5	85,2	0,37	5,4	1,8	3,6	2,6	3,2	—	—	6,5
30-50	6,5	4,3	0,3	7,1	81,8		7,3	2,9	4,4	3,4	3,8	4,7	5,7	7,0
50-100	4,0	2,8	1,6	9,7	82,5		7,7	3,6	4,1	4,2	4,8	5,5	6,5	8,3
100-150	2,3	3,8	0,7	5,7	87,5		9,9	1,6	8,3	2,3	2,8	3,4	3,9	6,8
Cote-d'Ivoire : Sables roux quaternaires — Série PB2 (Ivory Coast : Reddish-brown quaternary sands — PB2 series)														
0-15	0,6	0,4	0,1	1,3	97,6	0,41	1,1	0,9	0,2	1,5	1,7	2,1	—	3,0
15-30	1,0	1,8	0,1	1,0	96,1	0,28	1,6	0,9	0,7	1,5	1,8	1,9	—	2,6
30-50	0,8	0,8	0,4	2,3	95,7		2,0	0,9	1,1	1,1	1,3	1,7	—	2,1
50-100	0,5	1,3	0,7	3,8	93,7		2,8	0,6	2,2	0,8	1,2	1,3	1,5	2,9
100-150	0,5	3,8	0,1	2,5	93,1		3,6	0,7	2,9	1,5	1,4	1,8	1,9	2,1

A = argile (clay)

L = limon (silt)

Stf = sables très fins (very fine sands)

Sf = sables fins (fine sands)

Sg = sables grossiers (coarse sands)

MO = matière organique (organic matter)

CC = capacité au champ (field capacity)

PFP = point de flétrissement permanent (permanent wilting point)

DED = domaine d'eau disponible (available water)

quantité appropriée d'eau d'arrosage à l'indice 8 de l'échelle de Mollisch alors que l'ouverture maximale correspond à l'indice 10. Les activités physiologiques des oléagineux pérennes commencent donc à diminuer quand le potentiel matriciel du sol est encore relativement proche de celui de la capacité au champ et donc nettement supérieur à celui du PFP. Ceci peut être dû au fait que la force de succion des racines s'accroît relativement peu quand le sol se dessèche et n'arrive pas à équilibrer la force de succion croissante et la

conductivité en eau plus faible de celui-ci ; la disposition superficielle du système racinaire du palmier qui n'exploite qu'un volume de sol relativement réduit, n'est probablement pas étrangère à ce phénomène.

Il existe peut-être un potentiel matriciel critique correspondant à « une eau facilement utilisable » qui caractériserait le sol au stade où le flux d'eau, entre le sol et les racines, deviendrait inférieur au flux d'eau entre la plante et l'atmosphère, correspondant à l'ETP. Mais comme l'intensité de la transpiration

dépend du pouvoir évaporant du climat, il s'ensuit que la valeur de ce potentiel matriciel critique dépendrait non seulement du sol mais aussi du climat ; elle pourrait également dépendre d'autres critères propres à la plante, comme la densité et la distribution du système racinaire.

2. — Méthode de prélèvements des échantillons de sol et méthode de mesure.

Les échantillons furent prélevés à la tarière à plusieurs profondeurs sur une vingtaine de profils pour chacune des séries PO1, PO2 et LM et seulement sur cinq pour les séries PB1 et PB2 pour lesquelles la variabilité locale est plus faible. Les prélèvements furent effectués en saison pluvieuse mais après 3 jours sans pluie afin de permettre à l'eau de gravité (drainage rapide) de s'écouler. Les échantillons de sol furent ensuite placés immédiatement après leur prélèvement dans des boîtes à tare pour la détermination des humidités à la CC par pesée (méthode gravimétrique) avant et après passage à l'étuve. C'est la seule méthode possible pour déterminer l'humidité à la CC qui ne peut être mesurée en laboratoire sur échantillons remaniés puisqu'elle correspond à des potentiels matriciels variables selon les types de sol. Des équipements tels que sondes à neutrons et tensiomètres ne sont utilisables que de façon très ponctuelle dans des structures

d'accueil scientifique et technique très spécialisées. D'autres prélèvements furent effectués pour les séries PB1 et LM après 3 jours sans pluie pour voir si la phase de drainage rapide était réellement terminée. Afin de réduire le nombre d'échantillons à traiter en laboratoire un profil moyen fut constitué pour chaque type de sol. Ces échantillons composites servirent à la détermination de la granulométrie (méthode internationale), du taux de matière organique, de la nature des argiles (par spectrométrie de rayons X) et des humidités à différents potentiels : 16 - 1 - 0,32 - 0,20 - 0,10 et 0,06 bars (les pF correspondants étant 4,2 - 3,0 - 2,5 - 2,3 - 2,0 et 1,8).

II. — RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. — Capacité au champ.

a) Variabilité des mesures.

Le nombre de mesures effectuées pour les séries LM, PO1 et PO2 est suffisant pour qu'il soit possible d'étudier la dispersion des valeurs individuelles relatives à chaque profondeur autour de leur moyenne (m) dans des classes égales à 10 p. 100 de la valeur de cette moyenne.

La dispersion est peu importante pour les 2 séries LM et PO1 comme le montre le tableau II.

TABLEAU II

Series	Profondeurs (Depths) - cm	Dispersion		
LM	0-15	90 p. 100	des résultats individuels sont compris dans la fourchette : (of individual results in range :)	$m \pm 20$ p. 100
	$\geq 15-30$	95-100 p. 100		$m \pm 10$ p. 100
PO1	0-40	77- 90 p. 100		$m \pm 20$ p. 100
	$\geq 60-70$	90-100 p. 100		$m \pm 10$ p. 100

Pour la série PO2, la dispersion est plus importante puisque, selon les profondeurs, 40 à 95 p. 100 des valeurs individuelles sont comprises dans la fourchette « $m \pm 20$ p. 100 » et que l'étendue de celle-ci doit être augmentée jusqu'à « $m \pm 50$ p. 100 » pour comprendre au moins 85 p. 100 des résultats individuels. Cette variabilité plus importante des mesures s'explique par une plus forte hétérogénéité locale du sol.

Les sols des séries PB1 et PB2 enfin se caractérisent par une bonne homogénéité. Pour la série PB1, la totalité des mesures individuelles est comprise dans la fourchette « $m \pm 15$ p. 100 » quelle que soit la profondeur.

Il est donc possible de conclure que dans la plupart des cas, la méthode gravimétrique permet d'obtenir une valeur moyenne assez précise de l'humidité d'un sol sous réserve d'utiliser un nombre de répétitions suffisamment important.

b) Cinétique du drainage, stabilité de la mesure de la capacité au champ.

Comme il a été dit dans un paragraphe précédent, l'humidité à la capacité au champ s'obtient, par définition, après 3 jours de drainage rapide. Il fallait donc vérifier que cette définition correspondait avec suffisamment de précision aux phénomènes réels pour

être acceptée comme une « notion d'intérêt pratique ». Une deuxième série de mesures de l'humidité *in situ* a donc été effectuée après 6 jours sans pluie pour deux sols très différents : l'un, la série LM, aux caractéristiques physiques moyennes et l'autre, la série PB1, caractérisée par une très faible teneur en éléments fins (Tabl. III). Des chutes de pluie ont malheureusement empêché de faire des mesures après 9 jours ce qui aurait permis d'étudier plus avant la cinétique du drainage.

TABLEAU III

Rapport entre les humidités après 6 et 3 jours de drainage

(Relationship between moistures after 6 and 3 days drainage)
p. 100

Profondeurs (Depths)	Série LM (Series) : sables tertiaires (tertiary sands)	Série PB1 : (Series) colluvions de sables tertiaires (colluvial soils of tertiary sands)
cm	p. 100	p. 100
0-15	97	84
15-30	97	87
30-50	98	89
50-100	98	91
100-150	96	96

Relations entre les caractéristiques hydriques (y) et les caractéristiques physiques (x) (Relationship between hydrological [y] and physical [x] characteristics)

y	x avec teneurs en (with contents) :							
	Humidité p. 100 P. S. (Moisture p. 100 D. W.)		Argile (Clay)		Argile + limon (Clay + silt)		Argile + limon + sables très fins (Clay + silt + very fine sands)	
	r	y = f(x)	r	y = f(x)	r	y = f(x)	r	y = f(x)
Capacité au champ (field capacity) = CC..... Point de flétrissement permanent (permanent wilting point) pF 4,2 (16 bars) = PFP..... Domaine d'eau disponible (available water) : DED = CC - PFP	0,878	y = 12,9 + 0,16 x	0,907	y = 12 + 0,16 x	0,852	y = 11,6 + 0,16 x		
	0,943	y = 1,43 + 0,29 x	0,957	y = 0,15 + 0,28 x	0,965	y = - 0,47 + 0,27 x		
	- 0,879	y = 13,6 - 0,33 x + 0,003 3 x ²	- 0,855	y = 14,6 - 0,32 x + 0,002 8 x ²	- 0,843	y = 15,2 - 0,31 x + 0,002 9 x ²		
	Autres potentiels matriciels (other matric potentials)							
cm d'eau (water) bars pF								
1 000	0,988	y = 3,60 + 0,33 x	0,986	y = 2,24 + 0,32 x	0,985	y = 1,30 + 0,33 x		
316	0,963	y = 4,37 + 0,36 x	0,963	y = 4,37 + 0,36 x	0,973	y = 1,79 + 0,35 x		
200	0,961	y = 5,54 + 0,42 x	0,972	y = 3,57 + 0,41 x	0,986	y = 2,34 + 0,42 x		
100	0,974	y = 7,49 + 0,42 x	0,986	y = 5,64 + 0,41 x	0,988	y = 4,41 + 0,42 x		
63	0,920	y = 16,22 + 0,38 x	0,937	y = 14,47 + 0,38 x	0,938	y = 13,33 + 0,39 x		

Tous les coefficients de corrélation r sont significatifs à (All coefficients of correlation r are significant at) : 1 p. 1.000

Les résultats montrent que le drainage est entré dans une phase lente après 3 jours pour la série LM puisque la perte relative d'humidité entre 3 et 6 jours est de l'ordre de 3 p. 100 seulement. Au contraire, le drainage rapide s'est poursuivi au-delà de 3 jours pour la série PB1 puisque les pertes relatives varient entre 4 et 13 p. 100 (16 p. 100 pour la couche superficielle pour laquelle les pertes par évaporation ont pu intervenir). La définition de la CC semble donc pouvoir être acceptée pour des sols à caractéristiques physiques moyennes, car elle correspond apparemment à l'humidité marquant le passage entre la phase de drainage rapide et la phase de drainage lent (Feodoroff 8). Elle convient beaucoup moins bien pour les sols très sableux riches en sables grossiers pour lesquels la transition entre les deux phases de drainage est peut-être beaucoup moins nette à cause du très faible potentiel matriciel correspondant à la CC (cf. paragraphe 2 ci-dessous). Pour les sables grossiers, la différence entre l'humidité obtenue après 3 jours de drainage et celle du PFP, surestime donc la valeur réelle du DED qui ne peut être déterminée avec précision que par une étude fine de la cinétique de drainage.

2. — Relation entre les caractéristiques hydriques et les caractéristiques physiques du sol.

Le tableau IV donne pour les sols des séries LM, PO1, PO2 les coefficients de corrélation r et les équations de régression entre, d'une part les humidités relatives à la CC, au PFP, au DED et aux autres potentiels matriciels, d'autre part certaines caractéristiques granulométriques telles que : argile, argile + limon, argile + limon + sables très fins (ou limon grossier). Les coefficients de corrélation, tous significatifs à 1 p. 1 000, mettent en évidence que les caractéristiques hydriques du sol sont liées à la texture. Ces coefficients r sont pratiquement identiques quelles que soient les fractions considérées. Ceci s'explique en grande partie par le fait que les teneurs en limon et en sables très fins sont faibles et peu différentes les unes des autres ; ajouter ces teneurs à celles de l'argile revient donc à ajouter des valeurs presque constantes qui ne modifient pas les coefficients de corrélation. Il n'est peut-être pas possible de préjuger des humidités aux mêmes pF pour des sols dont les teneurs en limon seraient plus élevées ou bien domineraient la fraction fine. Dans la suite de cette discussion, il sera donc fait référence surtout aux relations avec la teneur en argile.

Les équations de régression peuvent être toutes ajustées à des droites (Fig. 1) sauf pour le DED pour lequel l'ajustement à une courbe du second degré est préférable (Fig. 2). Ces relations montrent bien entendu que les humidités à la CC ou à un pF donné sont des fonctions croissantes de la teneur en éléments fins. Il est à remarquer que si les droites des différents pF forment un réseau presque parallèle (les coefficients angulaires varient de 0,29 à 0,42), la droite représentative de la CC (coefficient angulaire 0,16) coupe le faisceau précédent avec les conséquences suivantes :

- le potentiel matriciel de la CC varie avec la texture selon une relation probablement linéaire qui a été déterminée graphiquement (Fig. 3) ;
- le DED diminue quand le taux d'éléments fins

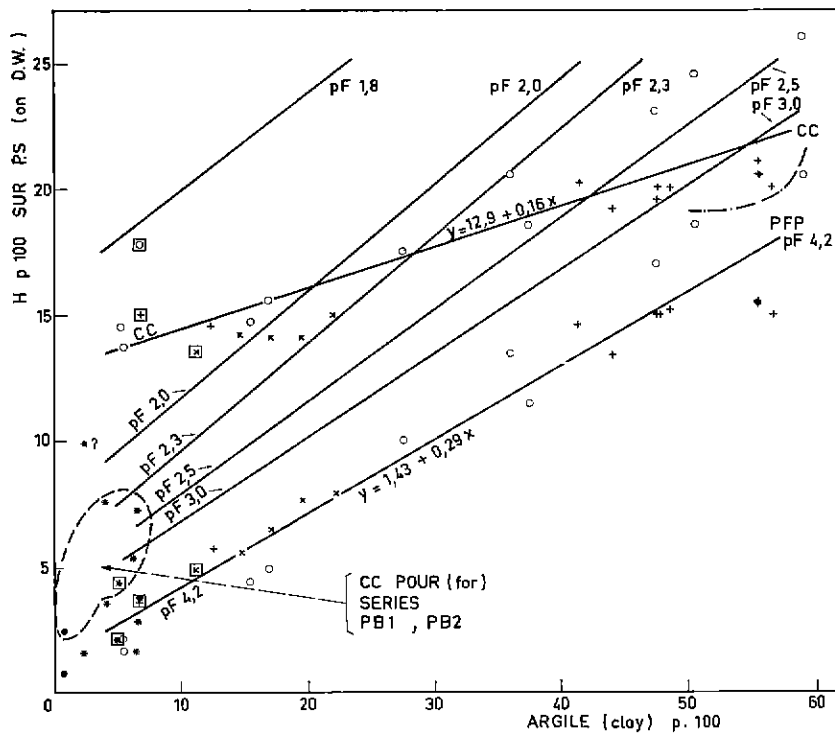


FIG. 1. — Humidités à la capacité au champ et à différents pF en fonction des teneurs en argile (moistures at field capacity and at different pF in function of clay contents).

+ : Terre de barre — série Pobé = PO1 (series)
 ○ : Colluvions de terre de barre — série Pobé 2 = PO2 (series)
 × : Sables tertiaires (Tertiary sands) — série La Mé = LM (series)
 * : Colluvions de sables tertiaires (Colluvial soils of tertiary sands) — série Port-Bouet 1 = PB1 (series)
 ● : Sables roux (Reddish-brown sands) — série Port-Bouet 2 = PB2 (series)
 □ : Couche superficielle pour tout type de sol (Topsoil for all types of soil).
 (10,6 →) : valeurs calculées de H p. 100 d'après $y = f(x)$ — (calculated values of p. 100 H according to $y = f(x)$).

FIG. 2. — Domaine d'eau disponible en fonction de la teneur en argile (Available water in function of clay content).

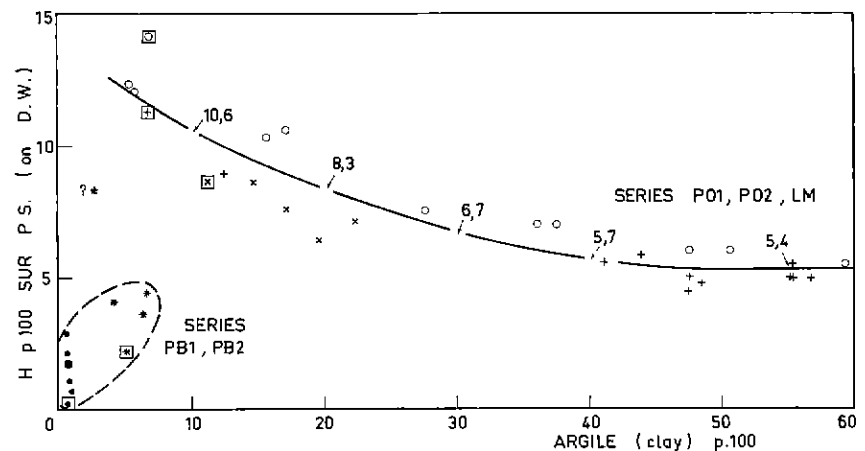
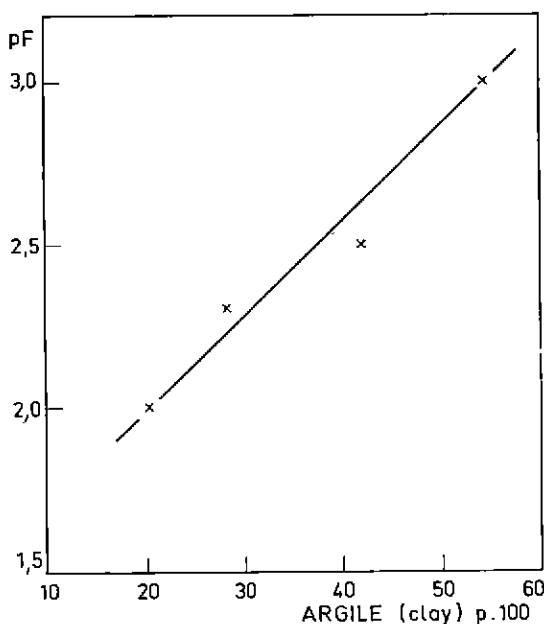


FIG. 3. — Valeurs du pF à la capacité au champ en fonction des teneurs en argile (pF values at field capacity in function of clay contents).



augmente (Fig. 2). Les résultats des études antérieures de l'I. R. H. O. sont ainsi confirmés ;

— le parallélisme relatif des droites des différents pF peut s'expliquer par le fait que les mesures sont effectuées sur de petits échantillons très minces et remaniés puisque tamisés à 2 mm. La « structure » de ces échantillons tend donc à être standardisée et n'a plus grand chose en commun avec la structure *in situ*. Le phénomène d'adsorption deviendrait donc prépondérant si bien que la quantité d'eau retenue dépendrait surtout de la surface des particules colloïdales qui augmente avec la teneur en argile. Au contraire, dans le sol en place cette quantité d'eau dépend aussi très certainement de la structure réelle pour les potentiels faibles inférieurs à 1 bar [7]. L'allure des courbes serait certainement différente avec des mesures d'humidités réalisées *in situ* (avec sonde à neutrons et tensiomètre) ;

— la quantité d'eau retenue à la CC est égale à la somme de l'humidité fixée par adsorption et par les plus petits micropores (PFP), et de l'eau de capillarité à drainage lent retenue par les capillaires de taille

intermédiaire. Lorsque la teneur en argile augmente, la quantité d'eau retenue à la CC augmente également, mais le DED diminue. Il faut donc admettre que le volume des micropores et la quantité d'eau adsorbée augmentent relativement plus vite que la CC. Pour vérifier cette hypothèse il faudrait avoir recours aux observations sur lames minces afin d'étudier les variations de taille des capillaires en fonction de la teneur en argile ;

— les sols très sableux des séries PB1 et PB2, constituées à 80-95 p. 100 par des sables grossiers, ont un comportement très différent de celui des sols précédents. Cette différence apparaît très bien sur les figures 1 et 2 et le tableau V qui donne la moyenne des humidités réellement mesurées comparées aux valeurs calculées d'après les équations précédentes ;

— la coïncidence entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées n'existe que pour le PFP qui dépend donc essentiellement de la teneur en éléments fins et très peu ou pas de la structure. Par contre, pour tous

les autres paramètres, les valeurs observées sont largement inférieures aux valeurs calculées. Ces sols retiennent donc beaucoup moins d'eau que les sols précédents à teneurs en argile égales. Il faut donc admettre que dans la catégorie des sols très sableux la teneur en argile ne permet plus de prévoir avec certitude la quantité d'eau disponible pour les plantes. La répartition des pores dépend peut-être alors plus de la granulométrie des sables que la teneur en argile ;

— il faut souligner au passage que la CC de tels sols qui correspondrait à peu près au pF 1,8 est néanmoins extrêmement faible. Le DED augmente semble-t-il avec la teneur en argile (Fig. 2) à l'inverse de tous les résultats précédents. Pour concilier ces deux phénomènes opposés, il faudrait imaginer qu'il existe une zone critique pour les teneurs en argile, comprise entre 10 et 20 p. 100, en dessous de laquelle le DED risquerait de diminuer brutalement pour certaines catégories de sols sableux probablement les plus grossiers.

TABLEAU V
Caractéristiques physiques et hydriques des sols très sableux
(Physical and hydrological characteristics of the very sandy soils)

Série (Series)	Granulométrie moyenne du profil (Main grain size distribution of profile)		Humidités (Moistures)													
			Valeurs mesurées : moyenne du profil (Measured values : mean of profile) (*)							Valeurs calculées pour A + L d'après le tableau IV (Values for A + L calculated according to table IV)						
	A	A + L	CC	(PFP) 4,2	DED	pF				CC	(PFP) 4,2	DED	pF			
						3,0	3,5	2,3	1,8				3,0	2,5	2,3	1,8
PB1	4,8	8,2	6,9	2,4	4,5	3,4	4,1	—	7,7	13,3	2,4	12,2	4,9	5,7	—	17,6
PB2	0,7	2,3	2,2	0,8	1,4	1,3	1,5	1,8	2,5	12,4	0,8	13,9	3,0	3,6	6,6	15,3

(*) Valeur obtenue après 3 jours de drainage (Value obtained after 3 day's drainage).

3. — Incidence sur le choix des sols.

La relation inverse entre le DED et la teneur en argile montre donc que dans les zones climatiques soumises à un déficit hydrique il y a tout intérêt à choisir des sols ayant la texture la plus légère, en évitant toutefois de franchir le seuil de 15 p. 100 d'argile au-delà duquel il n'est plus possible de prévoir à coup sûr l'importance du DED, sauf s'il a été mesuré ou si l'on dispose de preuves agronomiques telles que les performances de champs de comportement.

4. — Comparaison avec d'autres sols.

a) Sols sableux.

Les sols dior, très sableux du Sénégal, ont été étudiés par R. Nicou et J. L. Chopart [9]. L'argile est de

la kaolinite, la fraction sableuse est surtout représentée par des sables fins.

Le DED est intermédiaire entre ceux des séries de Port-Bouet et des horizons sableux de la série PO2 pour une teneur en argile comparable, ce qui n'est donc pas en contradiction avec les hypothèses précédentes.

b) Sols sablo-argileux et argilo-sableux.

Les Acid Sands (phase Calabar) du bassin sédimentaire tertiaire du Sud de la Nigeria sont très proches des sables tertiaires de Côte-d'Ivoire (série LM). Leurs caractéristiques physiques et hydriques moyennes figurent dans le tableau VII.

Les relations entre les humidités à différents pF et les teneurs en argile (Tabl. VIII) sont très voisines de

TABLEAU VI
Sols dior du Sénégal (Dior soils of Senegal) [9]

Profondeur (Depth) (cm)	Granulométrie (Grain size distribution) p. 100 P. S (D. W.)					Caractéristiques hydriques (Hydrological characteristics)			MO p. 100
	A	L	Stf	St	Sg	CC	PFP (4,2)	DED	
0-20	4,4	1,8	4,1	65,5	23,8	≠ 6	1,9	≠ 4,0	0,5
20-40	6,0	2,6	4,4	64,2	22,5	≠ 8	2,4	≠ 5,5	0,3

TABLEAU VII. — Nigeria. Acid Sands

Profondeurs (Depths) (cm)	Granulométrie (Grain size distribution) — p. 100 P. S. (D. W.)					MO p. 100	Caractéristiques hydriques : humidité — p. 100 P. S. aux pF (Hydrological characteristics : moisture — p. 100 D. W. at pF) :		
	A	L	Stf	Sf	Sg		4,2	2,3	2,0
0-20	12,9	2,0	1,2	14,3	69,5	1,9	6,4	9,3	15,2
30-50	19,3	2,6	1,7	13,9	62,5	1,1	7,7	11,9	17,0
60-80	20,1	2,5	1,9	13,8	61,7		7,9	13,2	17,8
90-110	21,0	2,5	1,6	14,1	60,8		8,2	13,4	19,4

celles obtenues à partir de sols étudiés en Côte-d'Ivoire et au Bénin.

c) Sols sablo-argileux et argilo-sableux à montmorillonite.

Les caractéristiques moyennes d'un sol des Philippines formé sur du corail plus ou moins altéré figurent dans le tableau IX. A la différence de tous les sols précédents, la montmorillonite domine largement la fraction argileuse ; d'autre part ce sol est plus riche en limon et en matière organique.

Les relations entre les humidités à différents pF et

TABLEAU VIII

Acid Sands. Relations entre caractéristiques hydriques (y) et physiques (x)
(Relationship between hydrous [y] and physical [x] characteristics)

y Humidité aux pF (Moisture at pF)	x Teneurs en argile (Clay contents)
4,2	$r = 0,89***$ $y = 1,98 + 0,30 x$
2,3	$r = 0,86***$ $y = 2,96 + 0,50 x$
2,0	$r = 0,84***$ $y = 5,68 + 0,65 x$
	x varie de (varies from) 7,5 — 29 p. 100

TABLEAU IX. — Philippines. Sol sur corail (Soil on coral)

Profondeur (Depth) (cm)	Granulométrie (Grain size distribution) — p. 100 P. S. (D. W.)					MO p. 100	Caractéristiques hydriques : humidité — p. 100 P. S. aux pF (Hydrological characteristics : moisture — p. 100 D. W. at pF) :				
	A	L	Stf	Sf	Sg		4,2	3,0	2,5	2,3	2,0
0-20	26,4	9,1	15,4	36,6	12,5	4,2	12,0	21,2	25,1	27,7	33,6
30-50	31,0	10,2	13,8	33,6	10,9	2,1	12,7	22,4	25,5	27,7	32,5

les teneurs en argile (Tabl. X) sont cette fois-ci très différentes de celles des sols à kaolinite. A égalité de teneurs en argile, elles donnent des humidités très supérieures. A potentiel égal la montmorillonite retient donc beaucoup plus d'eau que la kaolinite et la différence des quantités d'eau fixées entre un potentiel faible et le PFP est plus élevée. Il est à peu près certain que le DED de ce type de sol est plus important que celui des sols à kaolinite, à granulométrie égale.

Il semble donc que les relations entre caractéristiques physiques et hydriques mises en évidence pour

les sols faisant l'objet de l'étude peuvent être généralisées, à d'autres sols possédant des caractéristiques voisines avec prudence malgré tout et à condition toutefois de rester dans le domaine des sols à kaolinite.

III. — CONCLUSIONS

L'étude qui vient de faire l'objet du présent article permet de dégager les propriétés hydriques essentielles de quelques sols possédant des caractères physicochimiques communs à de nombreuses formations pédologiques de l'aire de culture du palmier à huile et du cocotier.

Les humidités correspondant au potentiel matriciel du point de flétrissement permanent (pF 4,2) et aux potentiels inférieurs (jusqu'à pF 1,8 au moins) sont des fonctions linéaires croissantes de la teneur en argile

Les cinétiques de drainage montrent que l'humidité résiduelle après trois jours de drainage peut être considérée comme celle de la capacité au champ sauf pour les sols très sableux pour lesquels la phase de prainage rapide serait plus longue.

L'humidité à la capacité au champ est également une fonction linéaire croissante de la teneur en argile. Le potentiel matriciel correspondant augmente avec la

TABLEAU X

Sol sur corail. Relations entre caractéristiques hydriques (y) et physiques (x)

(Soil on coral. Relationship between hydrological [y] and physical [x] characteristics)

y Humidité aux pF (Moisture at pF)	x Teneurs en argile (Clay contents)
4,2	$r = 0,962***$ $y = -0,41 + 0,45 x$
2,5	$r = 0,855***$ $y = 9,43 + 0,55 x$
2,3	$r = 0,861***$ $y = 11,96 + 0,55 x$
2,0	$r = 0,793***$ $y = 19,72 + 0,46 x$
	x varie de (varies from) 15 — 41 p. 100

teneur en éléments fins de pF 1,8 pour les sols les plus sableux à pF 3 pour des sols contenant 55 p. 100 d'argile.

Le domaine d'eau disponible, à l'inverse de la CC et du PFP, est une fonction décroissante de la teneur en argile. La quantité d'eau utilisable par les plantes est de l'ordre de 9 à 10 p. 100 sur poids sec de terre pour une teneur en argile de 15 p. 100, elle n'est plus que de 5 à 6 p. 100 pour une teneur en argile de 40 p. 100. Cependant, les sols très sableux font exception à la règle : quand les sables grossiers dominent, le domaine d'eau disponible s'effondre jusqu'à des valeurs aussi faibles que 2 ou 3 p. 100 d'humidité ; par contre, le comportement irrégulier des sols à sables fins est

difficilement prévisible d'après les seules données des analyses physiques classiques.

Sur la base de ces résultats l'I. R. H. O. recommande pour les programmes de développement en régions relativement sèches de s'orienter de préférence vers des sols à texture légère tout en évitant de franchir le seuil de 15 p. 100 au-delà de 40 cm de profondeur sauf, bien entendu, s'il existe une nappe phréatique peu profonde.

Il faut éviter de généraliser ces conclusions à tous les types de sol et en particulier aux sols dont la fraction argileuse contient une appréciable quantité d'argiles gonflantes (montmorillonite, illite).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] SURRE C. (1968). — Les besoins en eau du palmier à huile. Calcul du bilan de l'eau et ses applications pratiques, *Oléagineux*, 23, p. 165-167.
- [2] I. R. H. O. — Rapport Annuel 1966, p. 18-19.
- [3] COOMANS P. (1975). — Influence des facteurs climatiques sur les fluctuations saisonnières et annuelles de la production du cocotier. *Oléagineux*, 30, p. 153-159.
- [4] DESMAREST J. (1965). — Essai d'irrigation sur jeunes palmeraies industrielles. *Oléagineux*, 20, 441-447.
- [5] DANIEL C. et de TAFFIN (1974). — Conduite des jeunes plantations de palmier à huile en zone sèche au Bénin (ex — Dahomey). *Oléagineux*, 29, p. 227-232.
- [6] OCHS R. et OLIVIN J. (1965). — Réserves en eau d'une palmeraie. *Oléagineux*, 20, p. 231-235.
- [7] HILLEL D. (1972). — *Soil and Water (Physical Principles and Processes)*. Academic Press, New York and London.
- [8] DUCHAUFFOUR P. (1970). — *Précis de pédologie*. Masson et Cie Editeurs.
- [9] NICOU R. et CHOPART J. L. (1977). — Les techniques d'économie de l'eau dans les sols sableux du Sénégal. IRAT-Congrès d'Ibadan, décembre 1977.

SUMMARY

Hydrological Properties of the Soils and Water Supply to perennial Oil Crops in West Africa.

J. OLIVIN and R. OCHS, *Oléagineux*, 1978, 33, n° 1, p. 1-12.

The hydrological properties of a few sedimentary soils planted to oil palm and coconut in the Ivory Coast and Benin are studied. They have in common homogeneous, deep profiles, a clay fraction composed mainly of kaolinite, small silt and organic matter contents. The particular case of the very sandy coastal soils (coarse sands) is approached. The hydrological characteristics studied are the moistures at field capacity (gravimetric measurement) and at different pF (measured in a laboratory), including that of the permanent wilting point. The presentation of the results is preceded by a commentary on the real significance of these characteristics in the water-soil-plant relationship and on the precision of the measurements. The interpretation of the results shows that for soils with at least 8-10 p. 100 clay, the moisture at field capacity and at different pF is an increasing linear function of the clay content, but that the available water diminishes when the clay content increases. The potential of field capacity also depends on texture. The very sandy soils containing 80-95 p. 100 coarse sand hold very little water usable by the plants. The case of soils rich in fine particles is more complicated. On the basis of these conclusions, the I. R. H. O. recommends that for development programmes in relatively dry regions preference should be given to soils with a light texture, but avoiding any with less than 15 p. 100 clay below 40 cm deep unless, of course, there is a high water table. It is to be understood that the conclusions only apply to soils similar to those which were used in this study, and that they do not take account of chemical composition problems which are also in part related to the texture.

RESUMEN

Propiedades hídricas de los suelos y alimentación hídrica de las oleaginosas perennes en el África occidental.

J. OLIVIN y R. OCHS, *Oléagineux*, 1978, 33, n° 1, p. 1-12.

Se estudia las propiedades hídricas de algunos suelos sedimentarios en los que se plantó palmas aceiteras y cocoteros en Costa de Marfil y en Benin. Todos tienen perfiles homogéneos, profundos, además de una parte arcillosa que incluye esencialmente caolinito, y de escasos contenidos de limo y materia orgánica. Se toca el caso particular de los suelos costeros muy arenosos (arenas gruesas) donde se plantó cocoteros. Las características hídricas que se estudian son las humedades en la capacidad de retención de campo (medida gravimétrica) y en diferentes pF (medidas de laboratorio), entre las cuales el punto de marchitez permanente. Un comentario sobre el verdadero significado de estas características en las relaciones agua-suelo-planta y sobre la precisión de medidas, precede al informe de los resultados. La interpretación de éstos muestra que en suelos cuyo porcentaje mínimo de arcilla es de 8 a 10 %, las humedades que corresponden a la capacidad de retención de campo y a los diferentes pF son funciones lineales crecientes del contenido de arcilla, pero que la cantidad de agua disponible y utilizable para la planta disminuye cuando el contenido de arcilla aumenta. El potencial de la capacidad de retención de campo también depende de la textura. Los suelos muy arenosos que comprenden 80 a 95 % de arenas gruesas contienen una cantidad muy escasa de agua utilizable por las plantas. El caso de los suelos ricos en arenas finas es más complejo. Con base en tales conclusiones, el I. R. H. O. recomienda que en las regiones relativamente secas se elija preferentemente para los programas de fomento suelos de textura ligera, procurando no sobrepasar el umbral de 15 % de arcilla debajo de 40 cm de profundidad, exceptuando por supuesto los casos de un nivel freático poco profundo. Desde luego estas conclusiones sólo valen para suelos parecidos a los que aquí se estudian, y prescinden de los problemas de composición química se que hasta cierto punto están vinculados a la textura.

Hydrological Properties of the Soils and Water Supply to perennial Oil Crops in West Africa

J. OLIVIN (1) and R. OCHS (2)

As everyone knows the oil palm and coconut are very greedy for water. Numerous observations show that maximum yield can only be attained if these plants dispose of a quantity of water very close or equal to the potential evapotranspiration (ETP). On a basis of the annual production recorded in the research stations to which it provides assistance, the I. R. H. O. has been able to show that there is an inverse relationship between the annual water deficit calculated according to a simplified method [1] and the bunch yield of the oil palm [2] or copra production in the coconut [3], all other things being equal.

In most cases the water requirements of perennial oil crops are provided solely by rainfall, but more or less satisfactorily. Obviously, there are privileged regions in the intertropical zone where the rainfall distribution is sufficient to compensate the ETP completely (100-150 mm/month according to the evaporating power of the climate). The soil then has a fairly limited role as a buffer, since the plants call on its water reserves only for a few days at a time and, furthermore, the reserve is very quickly reconstituted. However, the predominant rainfall regime, especially in West Africa, includes one or two dry seasons of unequal length during which the rainfall falls below the ETP. The soil then comes into play with its water reserves to reduce or compensate the momentary deficit.

Situation where a high water table (depth 2-3 m) makes up for the unfavourable consequences of a rainfall deficit are exceptional. Irrigation, requiring heavy investment, is still little used, in spite of the big yield increases it procures in very marginal climatic conditions [4, 5].

The hydrological characteristics of the soils, in particular the available water (DED), are therefore of primordial importance, as to a great extent they determine the agricultural value of the soils for perennial plants with a heavy water requirement. As early as 1957 R. Ochs undertook the first studies on the relationship between the hydrological and physical characteristics of oil palm soils. In 1965, in collaboration with J. Olivin [6], he published the results of observations made at the Pobe Station, showing that the available water diminishes when the percentage of fine particles increases. This result contradicted the theories currently held at the time, and was worth confirming and verifying by extending the study to other types of soil, in particular to the very sandy ones.

I. — EXPERIMENTAL PLAN

Amongst the many soils used for growing oil palm and coconut, a choice was deliberately made of soils with « simple », homogeneous, deep profiles, with no textural or structural discontinuity, so as to avoid too-sudden variations in the flow and the matric suction power [7] which would complicate both measurements and interpretation.

1. — The soils studied.

a) Classification.

The soils studied are those of the improvement stations of Pobe (Benin) and La Me (Ivory-Coast) for the oil palm and Port Bouet (Ivory Coast) for the coconut. They are representative of the large development zones devoted to these two crops (150 000 ha planted between 1964 and 1975 in the two countries). Soils very similar to those of La Me are found in the oil palm growing zones of Cameroon, Nigeria (Acid Sands-Calabar Fesc) and North Brazil (Barreiras formation).

Benin.

Weakly desaturated, leached, modal lateritic soils (Pobe Station).

— Red soil on clayey-sand sediments of the continental terminal, commonly called « terre de barre » and series PO1 in this article.

— Beige soil on colluvials of the above ; series PO2.

Ivory Coast.

Strongly desaturated, leached modal lateritic soil (La Me Station).

— Yellow soil on sandy-clay sediments of the continental terminal (Tertiary), usually known as « Tertiary sands » ; series LM.

Strongly desaturated, leached modal lateritic soil (Port-Bouet Station).

— Yellow soil on sandy colluvials of the preceding series ; series PB1.

Moderately weathered deposit soil (Port-Bouet Station).

— Reddish-brown sands of marine origin of the Quaternary ; series PB2.

b) Physical characteristics (Table I).

The grain size distribution shows that the clay content increases fairly gradually from the surface downwards in the LM and PO2 series, whilst there is a textural and structural discontinuity at the interface of the A and B horizons in the PO1 series. The PO1 and PO2 series, derived from the same sedimentary material, have small coarse sand contents ranging from 4 to 24 p. 100 and more often than not between 10 and 15 p. 100. On the contrary, the LM series has a higher coarse sand content, varying from 55 to 63 p. 100. When the clay contents are equivalent, samples of the PO1 and PO2 series are distinguished from those of the LM series by their very different sand contents. The PB1 and PB2 series are made of for 82 p. 100 (PB1) and 93 p. 100 (PB2) of coarse sand ; the clay content is negligible for PB2 and extremely small (\pm 5 p. 100) for PB1.

The detail grain size distribution of the sands also shows differences between the soils. The mean content for the whole profile of the fraction of coarse sand exceeding 400 μ in diameter is only 3 p. 100 for the PO1 and PO2 series ; still only 29 p. 100 for the LM series, where the coarse particles are therefore relatively fine, it reaches 55 p. 100 for PB1 and 77 p. 100 for PB2.

Nevertheless, all the soils concerned have small or very small silt and very fine sand (or coarse silt) contents, indicating an advanced degree of weathering.

The mineralogical types of the clays have been identified by X-ray spectra, which only give a semi-quantitative determination. These analyses show that for all soils studied the clay fraction consists mainly of a single, non-swelling clay : kaolinite. There are only traces of the other type of clays, montmorillonite and vermiculite, and their role as regards water can be considered negligible. The **organic matter** rates are low or very low, and should not have any appreciable effect on the hydrological characteristics of the soils.

c) Hydrological characteristics (Table I).

The water reserves usable by the plants and called « available water » (DED) are measured conventionally by the difference in soil humidity between the field capacity (CC) and the permanent wilting point (PFP). This is a simplification for practical purposes, as it must be underlined that these two concepts do not correspond to precise states of the soil or the soil-plant relationship [7,8] and, before studying the new results, it is indispensable to make a few remarks on the real significance.

The **field capacity** can be defined as the residual soil moisture left after the departure of the gravitational water following a rapid drainage phase fixed arbitrarily at 3 days. In actual fact, the real length of rapid drainage varies according to the type of soil, and furthermore it is followed by a period of slow drainage during which water losses can still be considerable [7]. Drying off may therefore be a continuous process [8], and the field capacity would correspond to a temporary state of the soil difficult to seize experimentally.

The permanent **wilting point** is the moisture below which wilting of the plant is irreversible. The matric corresponding potential (16 bars) (3) would be practically independent of soil and plant, even though certain plants could still use the hygroscopic water. In fact, definitive wilting probably does not occur as soon as the soil potential approaches or reaches

(1) I. R. H. O. Agronomy Department.

(2) Director, I. R. H. O. Agronomy Department.

(3) It should be mentioned that the matric potential can be defined as the energy required to extract the mass unit of water from the soil and change it into free water (at the same height, temperature and osmotic pressure). Numerically it is equal to the water tension P in the soil (tension due to capillarity, liquid-solid adherence...) ; by definition : $pF = \log P$, P being expressed in cm.

16 bars but sooner or later according to the plant's ability to resist drought. Thus the oil palm, for example, thanks to its highly efficient stomatic regulation, almost completely reduces its evaporation and retards the irreversible effect of the drying of the soil on its physiology for several weeks. The permanent wilting point therefore characterizes a precise state of the soil (water retains in equilibrium with a potential of 16 bars), but it does not always conform to a well-defined stage in the water-soil-plant relationship. However, it must not be thought that the physiological activities of the oil palm and coconut remain unchanged when soil moisture declines from field capacity towards the permanent wilting point. On the contrary, much work by the I. R. H. O. has shown that 2 or 3 weeks after the rains stop, at a time when the soil water reserve is far from being exhausted, the oil palm starts closing its stomata and reducing its transpiration. But this protective measure also reduces carbon dioxide absorption and consequently photosynthesis, growth and production. In an irrigation trial [4] a perceptible fall in yield was already noted when stomata opening was held by an appropriate amount of watering at 8 on the Mollisch scale where as the maximum opening is equivalent to a value of 10. The physiological activities of perennial oil plants therefore start to diminish when the matric potential of the soil is as yet fairly close to field capacity and consequently still above the permanent wilting point. This may be due to the fact the suction power of the roots increases relatively little when the soil dries out and cannot balance the growing suction power and the weaker water conductivity of the latter. The fact that the oil palm's root system is near the surface and only exploits a fairly reduced volume of soil is probably not stranger to this phenomenon.

There may be a critical matric potential corresponding to « easily available water » which would characterize the soil at the stage when the flow of water from the soil to the roots drops below the flow of water from the plant to the atmosphere or evapotranspiration, but as transpiration intensity depends on the evaporation power of the climate, it follows that the value of this critical level is contingent not only on soil but also on climate; it could also be subject to criteria proper to the plant itself such as the density and distribution of the root system.

2. — Method of Soil Sampling and Measurement.

Samples from a score of profiles were taken with an auger at different depths for each of the PO1, PO2 and LM series, but only from five in the PB1 and PB2 series, in which the local variability is smaller. Samples were taken in the rainy season after three rainless days so as to allow the gravitational water (rapid drainage) to run away. They were placed in tared dishes immediately for determination of moisture at field capacity by weighing (gravimetric method) before and after oven-drying. This is the only method possible for determining moisture at field capacity; this cannot be measured in a laboratory on samples which have been handled, as it corresponds to variable matric potentials according to the type of soil. Instruments such as neutron probes and tensiometers are only usable very occasionally in highly specialized scientific and technical surroundings. Further samples were taken in the PB1 and LM series after three more rainless days to see if rapid drainage phase was finished.

To cut down the number of samples to be analysed, a mean profile was made up for each type of soil. These compound samples were used to determine the grain size distribution (according to the international method), the organic matter content, the type of clay (by X-ray spectrometry) and humidity at different potentials: 16-1-0.32-0.20-0.10 and 0.06 bars (the corresponding Pf being 4.2-3.0-2.5-2.3-2.0-1.8).

II. — RESULTS AND COMMENTS

1. — Field capacity.

a) Variability of measurements.

The number of measurements taken for the LM, PO1 and PO2 series is sufficient to allow the scatter of individual values for each depth on either side of their mean (m) in classes equal to 10 p. 100 of the value of that mean. The scatter is small for both LM and PO1 series, as table II shows.

For the PO2 series, the scatter is greater, since according to the depth 40-95 p. 100 of the individual values are in the « $m \pm 20$ p. 100 » bracket, which has to be extended up to « $m \pm 50$ p. 100 » to take in at least 85 p. 100 of the individual results. This bigger variability in the measurements is explained by the greater local heterogeneity of the soil.

On the other hand, the soils of the PB1 and PB2 series have good homogeneity; for PB1 all the individual measurements are in the « $m \pm 15$ p. 100 » bracket, whatever the depth.

It can be concluded, therefore, that in most cases the gravimetric method gives a reasonably precise mean value for soil moisture on condition that a sufficiently large number of replications is used.

b) Kinetic of drainage - stability of field capacity measurement.

As stated in an earlier paragraph, the moisture at field capacity is obtained by « definition » after three days' rapid drainage. It had to be verified, therefore, that this definition fitted the real phenomena sufficiently closely to be accepted as a concept of practical interest. A second series of moisture measurements « in situ » was taken after 6 rainless days in two very different soils: LM series with average physical characteristics, and PB1, which has a very small fine element content (Table III). Unfortunately, showers made it impossible to take measurements after nine days, which would have enabled the drainage kinetic to be studied more thoroughly.

The results show that drainage entered on a slow phase after 3 days in the LM series, as the relative loss of moisture between 3 and 6 days is only about 3 p. 100. On the contrary, rapid drainage continued beyond 3 days for the PB1 series, the relative losses varying from 4 to 13 p. 100 (16 p. 100 for the topsoil, from which water is lost by evaporation). It seems, therefore, that the definition of field capacity can be accepted for soils with average physical characteristics, as to all appearances it corresponds to the moisture at the passage from rapid to slow drainage (Feodoroff 8). It is much less suitable for very sandy soils rich in coarse particles where the transition from one drainage phase to another is perhaps less marked because of the very weak matric potential corresponding to the field capacity (see para. 2 below). With coarse sands, the difference between the moisture obtained after three days' drainage and that of the permanent wilting point would thus overestimate the available water, which can only be determined accurately by a narrowed-down study of the drainage kinetic.

2. — Relationship between hydrological and physical characteristics of the soil.

For the LM, PO1 and PO2 series, table IV gives the coefficients of correlation r and the regression equations between the relative moisture at field capacity, at the permanent wilting point and in the available water, together with certain other matric potentials on the one hand, and different textures such as clay, clay + silt, clay + silt + very fine sand (or coarse silt) on the other. The coefficients of correlation, all significant at 1 p. 1 000, show that the hydrological characteristics of the soil are related to texture. These coefficients r are almost identical, whatever the fraction considered, which can be explained to a large extent by the fact that the silt and very fine contents are small and similar to one another; to add such contents to that of clay is therefore to add practically constant values which do not modify the coefficients of correlation. It is perhaps not possible to prejudice the moistures at the same pF for soils where the silt content is as great or greater than the fine fraction. Further on in this discussion, therefore, we will refer mainly to relationships with the clay content.

The regression equations can all be adjusted to lines (Fig. 1) except for the available water, which it is preferable to adjust to a second degree curve (Fig. 2). These relationships show, of course, that moisture at field capacity or at a given pF is in increasing function of the fine particle content. It is to be noted that if the lines of the different pF form an almost parallel array (the angular coefficients vary from 0.29 to 0.42), the line representing the field capacity (angular coefficient 0.16) cuts the preceding cluster with the following results:

- the matric potential of the field capacity varies with texture according to a probably linear relationship which has been defined graphically (Fig. 3);

- the available water decreases as the fine particle content increases (Fig. 2); thus, the results of previous I. R. H. O. studies are confirmed;

- the relative parallelism of the lines of the different pF can be explained by the fact that measurements are taken on small, very thin samples, reworked and sieved at 2 mm. The « structure » of these samples therefore tends to be standardized and no longer has much in common with the structure « in situ ». Adsorption thus becomes predominant, so that the quantity of water retained depends mainly on the surface of the colloidal particles, which increases with the clay content. In the soil in place, on the contrary, the quantity almost certainly depends on the real structure for weak potential below 1 bar [7]. The appearance of the curves would undoubtedly be different with moisture measurements made « in situ » (with neutron probe and tensiometer);

- the quantity of water retained at field capacity is equal to the sum of moisture fixed by adsorption and by the smallest micropores (permanent wilting point), and the slow drainage capillary water retained by the middle-sized capillaries. When the clay content increases, the quantity of water retained at field capacity increases as well, but the available water diminishes, so that it has to be admitted that the volume of the micropores and the quantity of water adsorbed increase relatively more quickly than field capacity. To verify this theory thin section observations would need to be made to study the variations in capillary size in function of clay content;

— the very sandy soils of the PB1 and PB2 series, made up of 80-95 p. 100 coarse sand, behave very differently to the preceding soils. This difference can be seen clearly in Figs. 1 and 2, and in table V, which gives the mean for the moistures really measured compared to the values calculated on the regression equations;

— measured and calculated values only coincide for the permanent wilting point, which therefore depends mainly on the fine element content and little or not on the structure. On the other hand, the observed values are well below the calculated ones for all the other parameters, so that for the same clay content these soils retain much less water than the preceding ones. It has to be admitted that with the very sandy soils the clay content no longer allows the quantity of water available to the plant to be estimated with certainty; the repartition of the pores may depend more on the texture of the sands than on the clay content;

— it must be stressed in passing that the field capacity of such soils, corresponding to a pF of about 1.8, is nevertheless extremely low. It seems that the available water increases with clay content (Fig. 2), contrary to all the foregoing results. To reconcile these opposing phenomena, it has to be imagined that there is a critical zone for clay content somewhere between 10 and 20 p. 100, below which the available water is likely to diminish sharply for certain categories of sandy soil, probably the coarsest.

3. — Influence on the choice of soils.

The inverse relationship between the available water and clay content implies that in climatic zones suffering from a water deficit there is every interest in choosing the soils with the lightest texture, whilst avoiding crossing the threshold of 15 p. 100 clay, beyond which it is no longer possible to foresee the size of the available water with certainty, unless it has been measured of there are agronomic proofs such as results of performance trials.

4. — Comparison with other soils.

a) Sandy soils.

The very sandy dior soils of Senegal have been studied by R. Nicou and J. J. Chopart [9]. The clay is kaolinite, the sandy fraction consists chiefly of fine particles.

The available water is intermediary to that of the PB series and the sandy horizons of the PO2 series for a comparable clay content, so there is no contradiction with the preceding hypotheses.

b) Sandy-clay and clayey-sand soils.

The Acid Sands (Calabar fasc) of the Tertiary sedimentary basin of South Nigeria are very similar to the Tertiary sands of the Ivory Coast (LM series). Their mean physical and hydrological characteristics are given in table VII.

The relationships between moisture at different pF and clay contents (Table VIII) are very close to those obtained from soils studied in the Ivory Coast and Benin.

c) Montmorillonite sandy-clay and clayey-sand soils.

The mean characteristics of a Philippines soil formed over more or less weathered coral are given in table IX. Unlike all the preceding soils, montmorillonite is largely dominant in the clay fraction; furthermore, this soil is richer in silt and organic matter.

This time, the relationships between moisture at different pF and the clay contents (Table X) are very different to those for kaolinite soils. For the same percentage of clay, the water contents are very much higher, thus for an equal potential montmorillonite retains much more water than kaolinite, and the difference in the quantities of water fixed between a low potential and the permanent wilting point is greater. It is almost certain that the available water of this type of soil is larger than that of kaolinite soils where the texture is the same.

It seems therefore that the relationships between physical and hydrological characteristics which have been demonstrated for the soils studied can be extrapolated, albeit with caution, to other soils with similar characteristics, on condition, however, that this is limited to the kaolinite soils.

III. — CONCLUSIONS

The study dealt with in this article has helped to pick out the essential hydrological properties of a few soils having physico-chemical characteristics common to many soil formations in the oil palm and coconut growing zone.

The moistures corresponding to the matric potential of the permanent wilting point (pF 4.2) and to the lower potentials (to pF 1.8 at least) are increasing linear functions of the clay content.

The kinetics of drainage show that residual moisture after 3 days' drainage can be considered as that of field capacity, except for very sandy soils where the rapid drainage phase would be longer.

Moisture at field capacity is also an increasing linear function of the clay content. The corresponding matric potential rises with the fine element content from 1.8 pF for the sandiest soils to pF 3 for soils with 55 p. 100 clay.

The available water, contrary to field capacity and permanent wilting point, is a decreasing function of clay content. The quantity of water usable by the plants is about 9-10 p. 100 on dry weight of soil for a clay content of 15 p. 100; it is no more than 5-6 p. 100 for 40 p. 100 clay. However, very sandy soils are exceptions to the rule; when coarse sand dominates, the available water shrinks to as little as 2 or 3 p. 100 moisture; on the other hand, the irregular behaviour of fine sandy soils is difficult to predict solely from the data provided by standard physical analyses.

On the basis of these results, the I. R. H. O. recommends that for development programmes in relatively dry regions preference should be given to soils with a light texture, but avoiding any with less than 15 p. 100 clay below 40 cm deep unless, of course, there is a high water table.

These conclusions should not be lightly extrapolated to all types of soil, in particular to those where the clay fraction contains an appreciable quantities of swelling clays (montmorillonite, illite).